

**ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ**

**Л.Д. Ландау и концепция нейтронных звёзд**

Д.Г. Яковлев, П. Хэнсель, Г. Бейм, К. Петик

*Описан небольшой фрагмент истории физики нейтронных звёзд 1930-х годов, связанный с Л.Д. Ландау. По воспоминаниям Розенфельда (Proc. 16th Solvay Conference on Physics, 1974, p. 174)], Ландау предложил концепцию нейтронных звёзд в обсуждении открытия нейтрона с Бором и Розенфельдом сразу после того, как новость об этом открытии достигла Копенгагена в феврале 1932 г. Приведены убедительные аргументы в пользу того, что обсуждение происходило в марте 1931 г., до открытия нейтрона, причём обсуждалась статья, написанная Ландау в Цюрихе в феврале 1931 г. и опубликованная лишь в феврале 1932 г. (Phys. Z. Sowjetunion 1 285). В этой статье Ландау упомянул о возможном существовании плотных звёзд, которые выглядят как одно гигантское атомное ядро; это можно рассматривать как первое предсказание или предвидение нейтронных звёзд, сделанное до открытия нейтрона. Совпадение дат открытия нейтрона и публикации статьи привело к неверной ассоциации статьи с открытием нейтрона. Кратко описан вклад Ландау в теорию белых карликов и в гипотезу о звёздах с нейтронными ядрами.*

PACS numbers: 01.65.+g, 26.60.-c, 97.60.Jd

DOI: 10.3367/UFNr.0183.201303f.0307

**Содержание**

1. Введение (307).
  2. Ландау и Бор (308).
  3. Статья Ландау "О теории звёзд" (309).
  4. Открытие нейтрона (310).
  5. Предсказание нейтронных звёзд после открытия нейтрона (310).
  6. Переосмысливая воспоминания Розенфельда (311).
  7. Звёзды с нейтронными ядрами (311).
  8. Заключение (312).
  9. Приложение. Хронология (313).
- Список литературы (313).

**1. Введение**

Нейтронные звёзды — очень компактные объекты с массой порядка массы Солнца и радиусом всего лишь около 10 км; их наблюдательные проявления крайне разнообразны — от радиопульсаров до компактных рентгеновских источников. Нейтронные звёзды не

только замечательны сами по себе, но и полезны для астрофизических исследований: они содержат сверхплотное вещество и позволяют исследовать его свойства. Хотя нейтронные звёзды были открыты как радиопульсары [1] в 1967 г., теоретически они изучались с 1930-х годов, в том числе с целью решения фундаментальных вопросов о заключительных стадиях эволюции звёзд, источниках энергии, высвобождаемой при взрывах сверхновых звёзд, и даже об источниках энергии обычных звёзд. В этих исследованиях великий советский физик Л.Д. Ландау (1908–1968) играл противоречивую роль. Цель статьи — прояснить вклад Ландау в физику нейтронных звёзд на основе анализа концепций, приведших к идеи нейтронных звёзд. Предварительные результаты этой работы кратко описаны в [2].

Для того чтобы ввести читателя в курс дела, приведём отрывок из широко цитируемого воспоминания Л. Розенфельда на Сольвеевском конгрессе по физике в 1973 г. Розенфельд описал состоявшееся в начале 1932 г. в Копенгагене обсуждение, в котором участвовали Ландау, Бор и он сам [3]:

«Я вспоминаю, что в тот же вечер, когда новость об открытии нейтрона достигла Копенгагена, у нас состоялось оживлённое обсуждение перспектив, которые создавало это открытие. В ходе обсуждения Ландау импровизировал о концепции нейтронных звёзд — "unheimliche Sterne", невероятных звёзд, которые были бы невидимы и неизвестны нам, если бы они не сталкивались с видимыми звёздами, что могло вызывать взрывы сверхновых. Несколько позднее он опубликовал статью с Иваненко, в которой он снова упоминал нейтронные звёзды как системы, "к которым квантовая механика была бы неприменимой"».

Впервые эта история была упомянута Беймом и Петиком [4], позднее Беймом [5], а также Шапиро и

Д.Г. Яковлев. Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, ул. Политехническая 26, 194021 Санкт-Петербург, Российская Федерация

Тел. (812) 292-71-80. Факс (812) 247-10-17

E-mail: yak.astro@mail.ioffe.ru, d.g.yak@yandex.ru

П. Хэнсель. N. Copernicus Astronomical Center, Bartycka 18, 00-716 Warsaw, Poland

Г. Бейм. Department of Physics, University of Illinois, 1110 W. Green Street, Urbana, Illinois 61801, USA,

К. Петик. Niels Bohr International Academy, Niels Bohr Institute, Blegdamsvej 17, DK-2100, Copenhagen, Denmark;

NORDITA, Royal Institute of Technology and Stockholm University, Roslagstullsbacken 23, SE-10691 Stockholm, Sweden

Статья поступила 1 октября 2012 г.

Cambridge  
24 February 1932.

Dear Bohr.

I enclose the proof of a letter I have written to "Nature" and which will appear either this week or next. I thought you might like to know about it beforehand.

The suggestion is that  $\alpha$  particles eject from beryllium (and also from iron) particles which have no net charge, and which probably have a mass about equal to that of the proton. As you will see, I put this forward rather cautiously, but I think the evidence is really rather strong. Whatever the prediction from Be may be, it has most remarkable properties. I have made many experiments which I do not mention in the

letter to "Nature" and they can all be interpreted readily on the assumption that the particles are neutrons. Feather has taken some pictures in the separation chamber and we have already found about 20 cases of recoil atoms. About 4 of these show an abrupt break and it is almost certain that ~~the~~ one arm of this track represents a recoil atom and the other (some other particle, probably an  $\alpha$  particle). They are disintegrations due to the capture of the neutron by  $N_{14}$  or  $O_{16}$ . I enclose two photographs, one of which shows the simple recoil atom, and the other what we suppose is a disintegration. The photographs are not very good but they were printed in a hurry.

With best regards  
Yours sincerely  
J. Chadwick.

Рис. 1. Письмо Чедвика Бору об открытии нейтрона. (Воспроизводится с любезного разрешения Архива Нильса Бора (Копенгаген) и Юдифь Чедвик.)

Тьюколски в монографии [6] (первое подстрочное примечание на с. 242). Естественно, сложилось впечатление, широко отражённое в литературе, что нейтронные звёзды были предсказаны Ландау вследствие открытия нейтрона. Мы покажем, что факты этого не подтверждают.

Джеймс Чедвик, открывший нейtron в 1932 г., сообщил Бору о своём открытии в письме, датированном 24 февраля 1932 г. (рис. 1); следовательно, упомянутое вечернее обсуждение должно было состояться сразу после этой даты. Тем не менее, как часто бывает в воспоминаниях участников какого-либо события много лет спустя после него, история Розенфельда оказалась лишьискажённым отражением реальной истории. С одной стороны, Ландау не был в Копенгагене в 1932 г. Более того, ни Бора, ни Розенфельда не было в Копенгагене, когда туда пришло письмо Чедвика. Оба путешествовали, и письмо Чедвика, видимо, пролежало на столе Бора до возвращения последнего во второй половине марта. Как будет показано в разделе 3, уже годом ранее у Ландау появилась идея о материи в звёздах, которая существует, "образовав одно гигантское [атомное] ядро". Более того, Ландау не писал статей о звёздах с советским физиком Д.И. Иваненко (см., например, [7]); скорее всего, Розенфельд имел в виду более раннюю статью Ландау (см. раздел 6). Тем не менее воспоминания Розенфельда указывают на важное звено в ранней истории нейтронных звёзд.

## 2. Ландау и Бор

Для понимания истинной причастности Ландау к физике нейтронных звёзд важно иметь представление о поездках Ландау по Европе и его встречах с Бором. Ландау окончил Ленинградский государственный университет в январе 1927 г., когда ему было 19 лет, и был принят в Ленинградский физико-технический институт (ныне Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН в Санкт-Петербурге) на должность, сходную с должностью нынешнего аспиранта. Его научным руководителем был



Рис. 2. Л.Д. Ландау в 1929 г.

Яков Ильич Френкель, возглавлявший теоретический отдел института. Как выдающийся аспирант, Ландау получил одну из двух стипендий Народного комиссариата просвещения, которая позволяла ему поехать на полтора года за границу для научной стажировки.

В октябре 1929 г. Ландау (на рис. 2 приведена его фотография того времени из монографии [8]) отправился в поездку и побывал во многих научных центрах Европы, включая (в хронологическом порядке) Берлин, Гётtingен, Лейпциг, Цюрих, Копенгаген, Кембридж и снова Копенгаген, Цюрих и Копенгаген. В частности, он гостил



**Рис. 3.** Ежегодная конференция в Институте теоретической физики в Копенгагене в 1930 г. В первом ряду (слева направо): О. Клейн, Н. Бор, В. Гейзенберг, В. Паули, Г.А. Гамов, Л.Д. Ландау, Х. Крамерс. (Воспроизведится с разрешения Архива Н. Бора в Копенгагене.)

у Бора в Копенгагене с 8 апреля по 3 мая 1930 г., с 20 сентября по 20 ноября 1930 г. и с 25 февраля по 19 марта 1931 г. [9, сноска на с. 359]. Ландау любил Бора и считал его своим единственным учителем; Бор отвечал взаимной симпатией. В начале 1931 г., когда стипендия Ландау иссякла, Бор помог ему получить стипендию Рокфеллера, что позволило Ландау продлить пребывание за границей и побывать у Бора в третий раз. На фотографии (рис. 3), сделанной во время ежегодной конференции Нильса Бора в Копенгагене в 1930 г., Ландау сидит в первом ряду (второй справа). После третьей поездки в Копенгаген Ландау вернулся в Ленинград и в том же году переехал в Харьков.

Ландау и Бор встречались позднее и в Копенгагене, и в Советском Союзе. Ландау посещал Копенгаген с 18 сентября по 3 октября 1933 г. и с 1 июня по 8 июля 1934 г., участвуя в конференциях, организованных Бором. После 1934 г. Ландау не бывал за границей (за исключением поездки на лечение в Чехословакию в 1963 г. после ужасной автомобильной аварии 7 января 1962 г., которая навсегда прервала его научную карьеру). Бор во время своих посещений Советского Союза встречался с Ландау три раза: в мае 1934 г. (Ленинград, Москва, Харьков), в июне 1937 г. (в Москве, в ходе полугодового кругосветного турне Бора по США, Японии, Китаю и Советскому Союзу) и в мае 1961 г. (в Москве) (см. [9, с. 415, 417, 528]).

### 3. Статья Ландау "О теории звёзд"

7 января 1932 г., более чем за месяц до того, как Чедвик объявил об открытии нейтрона, и даже прежде, чем Чедвик начал проводить эксперимент, приведший к этому открытию (см. раздел 4), Ландау послал статью [10] на английском в *Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion* — первый советский физический журнал, который публиковался на иностранных языках. Статья была опубликована 29 февраля 1932 г., через несколько дней после того, как Чедвик написал письмо Бору. Важно, что из последней строки статьи [10]: "Февраль 1931 года, Цюрих", — следует, что Ландау написал статью за год до открытия нейтрона в Цюрихе, но по неизвестным причинам отложил её представление в печать почти на год<sup>1</sup>. При пере-

<sup>1</sup> Карл Хуффбауэр [11] предполагает: "Он, по-видимому, хотел опубликоваться в *Nature*, самом популярном и ведущем журнале в данной области. Тем не менее обстоятельства сложились так, что, когда он

печатках статьи Ландау [12, 13] дата февраль 1931 года была опущена, что, в совокупности с воспоминаниями Розенфельда, привело к неправильной ассоциации открытия Чедвика с ранними идеями Ландау о нейтронных звёздах (см. раздел 6).

Статья на четырёх страницах, написанная в лаконичном стиле Ландау, состоит из двух частей, каждая из которых по-своему важна. В первой части выполнен изящный расчёт максимальной массы белых карликов, а во второй описывается возможная физика звёзд с более высокой плотностью. Максимальная масса — так называемый чандрасекаровский предел масс белых карликов — наибольшая масса, которую может удержать от гравитационного сжатия давление вырожденных релятивистских электронов. История теоретического предсказания этой массы описана, например, Нойенбергом [14] и Шавивом [15]. Проблема заключалась в возможности применения квантовой статистической механики для объяснения природы белых карликов; при этом не совсем ясно, насколько Ландау был знаком с другими работами того времени<sup>2</sup>. Ландау рассчитал максимальную массу независимо, но позднее Чандрасекара. Ландау вывел важную простую формулу:

$$M_0 = \frac{3,1}{m^2} \left( \frac{\hbar c}{G} \right)^{3/2}, \quad (1)$$

связывающую максимальную массу с четырьмя физическими параметрами: постоянной Планка  $\hbar$ , скоростью света  $c$ , гравитационной постоянной  $G$  и массой вещества  $m$ , приходящейся на один электрон. Для внутренних слоёв белых карликов Ландау положил  $m \approx 2m_p$  ( $m_p$  — масса протона), что даёт хорошо известное значение  $M_0 \approx 1,44 M_\odot$ , где  $M_\odot$  — масса Солнца. Заметим, что Ландау приводит  $M_0 \approx 1,5 M_\odot$  (в то время как Чандрасекар в первой статье [18] получил  $M_0 \approx 0,91 M_\odot$ , поскольку он предположил нереалистически высокое значение  $m = 2,5 m_p$ , как описано, например, в [15]). Хотя Ландау и не пишет об этом прямо, его формула показывает, что масштаб массы белых карликов определяется произведением массы протона  $m_p$  на постоянную  $\alpha_G^{-3/2} \approx 10^{57}$ , где  $\alpha_G = m_p^2 G / \hbar c$  можно назвать "гравитационной постоянной тонкой структуры".

Далее Ландау обсуждает более массивные звёзды. Хотя Ландау прямо не упоминает нейтроны в звёздах в течение ещё примерно шести лет, он пытается теоретически решить вопрос о коллапсе звёзд с массой, превосходящей  $M_0$ , при котором плотность повышается, предполагая при этом, что в более тяжёлых звёздах даже "нарушаются законы квантовой механики".

Ход размышлений Ландау хорошо пояснил [19] его коллега и друг Матвей Петрович Бронштейн, необычайно одарённый теоретик с очень широким кругом интересов — от физики твёрдого тела до квантовой

весной вернулся в Советский Союз, он привёз рукопись с собой в Ленинград, в Физико-технический институт, и послал её в только что созданный журнал *Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion* лишь в начале следующего года".

<sup>2</sup> Оценки максимальной массы впервые были сделаны Вильгельмом Андерсоном [16], а затем Эдмундом Клифтоном Стоунером [17]. Точный расчёт максимальной массы впервые выполнил, не зная о работах Андерсона и Стоуна, Чандрасекар в июле 1930 г. в статье [18], опубликованной в августе 1931 г.

гравитации (к сожалению, репрессированный сталинским режимом и расстрелянный в 1938 г.). Проблема источников звёздной энергии к тому времени не была решена, и различие между звёздами главной последовательности и белыми карликами было неясно. Для Ландау проблема энергии звёзд представлялась преградой, которая требовала выхода за рамки стандартной квантовой механики. Ландау предполагал (неверно), что рассчитанная им предельная масса  $1,5 M_{\odot}$  является максимальной массой для всех звёзд, в которых справедливы стандартные физические законы. Возможность того, что обычные массивные звёзды могут состоять из невырожденного вещества низкой плотности, не учитывалась. Более того, наблюдательные данные о существовании массивных звёзд были очень ограниченны. Любая звезда с массой более чем  $1,5 M_{\odot}$  рассматривалась Ландау как "патологическая", содержащая ядро из очень плотного вещества, в котором законы обычной физики (включая сохранение энергии) нарушаются; Ландау предполагал, что плотные "патологические" области могут возникнуть и в менее массивных звёздах [10]:

"Так как у нас нет оснований верить, что можно разделить звёзды на два физически различных класса в соответствии с критерием  $M >$  или  $< M_0$ , можно с большой вероятностью предположить, что такую патологическую область имеют все звёзды. Это не противоречит изложенным выше аргументам, которые доказывают, что условие  $M > M_0$  лишь достаточно (но не необходимо) для существования таких областей. Естественно думать, что именно наличие таких областей и делает звёзды звёздами. Но если так, то нам нет никакой нужды предполагать, что излучение звёзд обязано некоему таинственному процессу взаимной аннигиляции протонов и электронов, который никогда не наблюдался и для проявления которого именно в звёздах нет никаких специальных причин. В самом деле, протоны и электроны в атомных ядрах всегда находятся очень близко друг к другу и тем не менее не аннигилируют. Было бы очень странно, если бы высокие температуры могли помочь делу уже только потому, что помогают кое-чему в химии (цепные реакции!). Следуя красивой идее проф. Нильса Бора, можно думать, что излучение звёзд обязано просто нарушению закона сохранения энергии, который, как впервые указал Бор, не справедлив в релятивистской квантовой теории, когда отказываются законы обычной квантовой механики (что доказывается экспериментами по непрерывным спектрам излучения и стало вероятным благодаря теоретическому рассмотрению [20]). Мы ожидаем, что всё это должно проявляться, когда плотность материи станет столь большой, что атомные ядра придут в тесный контакт, образовав одно гигантское ядро".

Приведённые выше размышления о том, что атомные ядра состоят из протонов и электронов, которые не аннигилируют, — дополнительное доказательство того, что статья [10] была написана до открытия нейтрона. Предположение о том, что источники энергии звёзд могли находиться в "патологических ядрах", было удобным, но чрезсчур наивным. Более того, сейчас мы знаем, что идея объяснить энерговыделение в звёздах несохранением энергии в квантовой механике — вполне возможная в то время — оказалась ложной. Однако предвидение Ландау плотных (нейтронных) звёзд, которые выглядят как одно гигантское атомное ядро, оказалось пророческим.

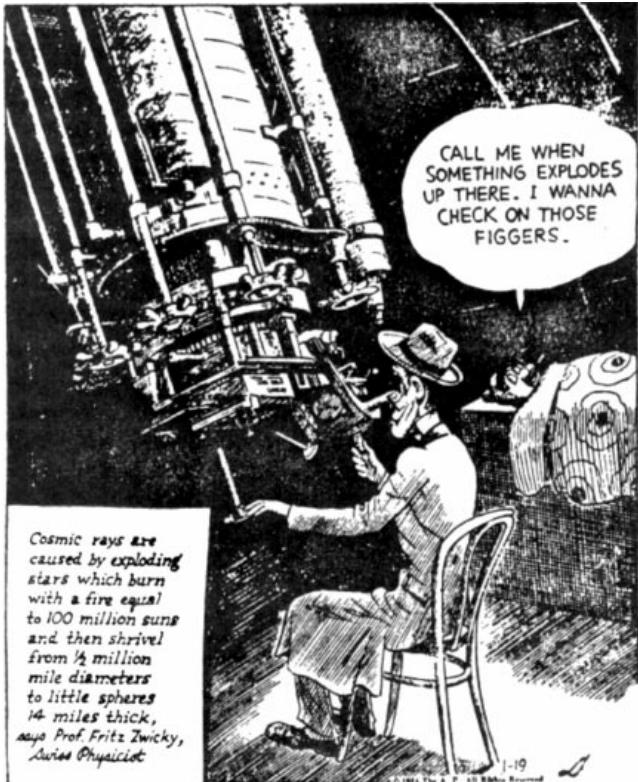
## 4. Открытие нейтрона

Нейтрон, предсказанный Резерфордом [21] в 1920 г., был в конце концов открыт Чедвиком [22], оставившим красочное описание открытия [23]. Чедвик неоднократно пытался найти свидетельства существования нейтрона, но каждый раз безуспешно. В начале 1932 г. он был очень вдохновлён статьёй Кюри и Жолио [24], опубликованной 28 января. Как указано во второй публикации Чедвика [25], посвящённой открытию нейтрона, эксперименты, подобные эксперименту Жолио и Кюри, были проведены также Боте и Бекером [26], Кюри [27] и Вебстером [28]; все эти эксперименты состояли в бомбардировке ядер бериллия альфа-частицами от полониевого источника. Авторы обнаружили нейтральные продукты реакции (которые они интерпретировали как гамма-лучи, выбивающие протоны из парафина). Чедвик и Резерфорд не поверили этой интерпретации. Чедвик немедленно приступил к работе, провёл аналогичные эксперименты, но с использованием лучшей аппаратуры и через несколько дней упорной работы получил тот же самый результат [23]. Однако Чедвик интерпретировал его правильно: как рождение нейтронов (а не гамма-лучей) в столкновениях  $\alpha + Be$ . Чедвик наконец добился своей цели; он даже смог оценить, используя законы сохранения энергии и импульса в реакциях выбивания, массу нейтрона, которая оказалась близка массе протона. Статья Чедвика об открытии нейтрона [22] была получена редакцией *Nature* 17 февраля и опубликована 27 февраля 1932 г. Детальные пояснения были даны в следующей статье [25].

Заметим, что первая теоретическая модель атомных ядер, состоящих из протонов и нейтронов, была предложена в апреле 1932 г. Иваненко [29].

## 5. Предсказание нейтронных звёзд после открытия нейтрона

Первое строгое предсказание нейтронных звёзд было сделано Вальтером Бааде и Фрицем Цвикки из Калифорнийского технологического института в декабре 1933 г., почти два года спустя после открытия нейтрона, в надежде объяснить огромное энерговыделение при взрывах сверхновых. Представляя свои результаты на съезде Американского физического общества в Стэнфорде 15–16 декабря 1933 г., Бааде и Цвикки сделали замечательное предсказание [30]: "... с полным основанием мы выдвигаем точку зрения, что сверхновые представляют собой переход от обычных звёзд к нейтронным звёздам, которые в своём окончательном виде состоят из плотно упакованных нейтронов". Они дали ещё более обоснованное описание этой действительно правильной картины в написанных в марте 1934 г. второй и третьей статьях [31, 32], посвящённых генерации космических лучей в сверхновых: «Такая звезда может иметь очень малый радиус и чрезвычайно высокую плотность. Поскольку нейтроны могут быть упакованы гораздо плотнее, чем обычные ядра и электроны, энергия "гравитационной упаковки" в холодной нейтронной звезде может быть велика и при определённых условиях намного превосходить таковую при обычной ядерной упаковке. Поэтому нейтронная звезда будет представлять собой наиболее устойчивую конфигурацию вещества». Только благодаря предположению о столь плотной упаковке Бааде и



**Рис. 4.** Карикатура из *Los Angeles Times* от 19 января 1934 г. по поводу предсказания нейтронных звёзд Бааде и Цвикки. В рамке в нижней части рисунка написано: «"Космические лучи вызваны взорвавшимися звёздами, которые вспыхивают, как факелы в 100 миллионов солнц, и съёживаются затем от диаметра в 1/2 миллиона миль до маленькой сферы размером 14 миль". — говорит профессор Фриц Цвикки, швейцарский физик». (Воспроизведется с разрешения Associated Press, 1934.)

Цвикки смогли объяснить энерговоыделение сверхновых, которое они оценили как эквивалентное таковому при аннигиляции нескольких десятков солнечных масс. В четвёртой публикации [33] Бааде и Цвикки наивно (и неверно) пояснили, что "нейтроны рождаются на поверхности обычной звезды" (под влиянием космических лучей) и «"дождём" падают к центру, если мы предположим, что давление света на нейтроны практически нулевое».

Идея о нейтронных звёздах, высказанная Бааде и Цвикки, быстро попала в популярную прессу, в частности нашла отражение в карикатуре (рис. 4) на страницах *The Los Angeles Times*<sup>3</sup>. Диаметр звезды, упомянутый в надписи на рисунке, на удивление правильный.

## 6. Переосмысливая воспоминания Розенфельда

Учитывая сказанное, мы наконец-то можем придать смысл воспоминаниям Розенфельда. Во-первых, как мы видим, нет никакой связи между открытием нейтрона и

идейей Ландау о нейтронных звёздах. Очевидно, в обсуждении с Бором и Розенфельдом Ландау не импровизировал концепцию невероятных звёзд (*unheimliche Sterne*). Скорее всего, обсуждение происходило во время третьего визита Ландау в Копенгаген в феврале и марте 1931 г., сразу после того, как он написал статью в Цюрихе. Было бы естественным, что Ландау обсудил её с Бором и Розенфельдом (последний прибыл в Копенгаген 28 февраля 1931 г. [35]), поскольку Ландау пытался использовать идеи Бора о нарушении законов обычной физики. Далее, используя термин *невероятные звёзды*, Розенфельд имел в виду идею Ландау о звезде как одном плотном гигантском атомном ядре, в котором нарушаются законы квантовой механики. Когда был открыт нейтрон, сразу отпала необходимость нарушать квантовую механику, чтобы избежать ненаблюдаемой аннигиляции электрона и протона. При наличии убедительных аргументов в пользу того, что упомянутое обсуждение с участием Бора, Ландау и Розенфельда произошло по прибытии Ландау в Копенгаген в 1931 г., кажется маловероятным, что оно могло произойти позднее, когда эти трое встречались, например, в период с 18 сентября по 3 октября 1933 г. или с 1 июня по 8 июля 1934 г. в Копенгагене, или во время одной из двух поездок Бора в Советский Союз в 1934 и 1937 гг. В 1931 г. *невероятные звёзды* просто относились к звёздам, которые выглядят как одно плотное атомное ядро, наподобие того как мы представляем нейтронные звёзды сейчас.

Мы не нашли никаких свидетельств того, что Ландау обсуждал *невероятные звёзды*, которые "были бы невидимы и неизвестны нам, если бы они не сталкивались с видимыми звёздами, что могло вызывать взрывы сверхновых". А ссылка Розенфельда на совместную статью Ландау и Иваненко, очевидно, на самом деле была ссылкой на статью Ландау, написанную в 1931 г. Возможно, имя Иваненко всплыло в связи со статьёй Иваненко [29] о протонно-нейтронном составе атомных ядер, написанной после открытия нейтрона.

## 7. Звёзды с нейтронными ядрами

Источники звёздной энергии оставались неизвестными до 1938 г. (см., например, [15]). Кроме того, эволюция звёзд с  $M > M_0$  оставалась теоретической загадкой. Существовало предположение, что такие звёзды содержат ядра сильно сжатого вещества (см., например, [36]). Во второй половине 1934 г. в Тринити-колледже Чандraseкар привёл серьёзные аргументы против этого предположения, выдвинув идею о том, что сильное сжатие приводит к потере массы или взрыву сверхновой [37, 38]. Между тем Гамов [39], анализируя ранние идеи Чандraseкара (1931 г.) и Ландау (1932 г.), писал, что более массивные звёзды "являются объектами, внутри которых на определённом этапе их существования образуется ядерная материя". Эта материя могла образоваться при бета-захватах электронов атомными ядрами, когда протоны превращаются в нейтроны. (Хотя Гамов и не даёт соответствующей ссылки, первое микроскопическое описание уравнения состояния ядерной материи при условии бета-равновесия было дано годом ранее Хундом [40].) При гравитационном сжатии такое уравнение состояния позволило бы не только получить энергию, "достаточную, чтобы обеспечить жизнь звезды в течение длительного времени", но и описать взрывные процессы на

<sup>3</sup> Мы благодарны Янушу Циолковскому (Janusz Ziolkowski), обратившему наше внимание на этот рисунок, который был представлен в докладе Роберта Киршнера (Robert P. Kirshner) на Восьмом техасском симпозиуме по релятивистской астрофизике [34]. Кроме того, мы благодарны Р. Киршнеру за полезную информацию, касающуюся этого рисунка.

границе плотной ядерной материи, которые могли бы привести к извержению "ядерной материи" и образованию различных ядер, способствуя протеканию нуклеосинтеза.

Ландау, независимо от Гамова, обратился к вопросу о звёздной энергии в статье, сначала опубликованной в *Докладах Академии наук СССР* [41] в 1937 г., а затем в *Nature* [42] (послана из Москвы через Бора в Копенгаген в конце 1937 г.). Ландау предположил, что обычные звёзды с массой, превышающей некоторую критическую массу  $\sim 0,001 M_{\odot}$ , имеют нейтронное ядро, "где все ядра и электроны превратились в нейтроны". С энергетической точки зрения такое ядро было бы более выгодным, чем нормальное ядро. Для Ландау это был шаг от "патологических" ядер звёзд с неизвестной физикой в его статье [10] 1931 года к нейтронным ядрам, которые описываются стандартной физикой. Оболочка звезды медленно сжимается (аккрецирует на компактное ядро). Огромного выделения гравитационной энергии (ввиду компактности ядра) в процессе акреции было бы достаточно, чтобы подогревать звезду и поддерживать её светимость на высоком уровне длительное время. В частности, Ландау закончил статью [42] призывом строить модели таких звёздных объектов. Он цитирует в [42] раннюю статью Хунда, но только в контексте предположения Бора и Мёллера [43]. Ландау, как и Гамов, подчёркивает, что нейтронное ядро "даёт непосредственную возможность разрешить вопрос об источниках звёздной энергии".

Заметим, что политическая атмосфера в Советском Союзе в 1937 г. резко ухудшилась и над Ландау нависла реальная угроза ареста. Чтобы предотвратить этот арест, П.Л. Капица организовал широкую пропаганду работы Ландау, стремясь сделать Ландау знаменитым учёным (включая положительные отзывы в прессе (см. статью Хуффбауэра [11], в которой приводится забавная история публикации работы)). Однако политический режим не обращал внимания на подобные кампании. Ландау был арестован в 1938 г. за "антисоветскую деятельность" и провёл год в тюрьме. Он был освобождён (и условия его содержания в тюрьме были значительно смягчены) в основном благодаря усилиям Капицы, который не побоялся написать несколько писем в защиту Ландау Сталину и другим высокопоставленным советским деятелям [44]. Любопытно, что в первом письме Сталину 28 апреля 1938 г., непосредственно в день ареста Ландау, Капица писал, что Ландау "опубликовал одну замечательную работу, где он первый указал на новый источник энергии звёздного лучеиспускания". Тем самым статья Ландау была использована для того, чтобы спасти ему жизнь.

После того как Ландау освободили, было уже ясно (см., например, [45]), что обычные звёзды поддерживают свою жизнь благодаря ядерному горению. Проблема источников звёздной энергии была решена, и призыв Ландау был временно забыт. Однако идея была осуществлена позднее в виде объектов Торна–Житковой — гипотетических звёздных объектов, которые снаружи выглядят как обычные гиганты или сверхгиганты. Внутри такие объекты содержат мощные конвективные оболочки и плотные вырожденные ядра, так же как и гиганты или сверхгиганты. Однако обычные гиганты или сверхгиганты содержат ядра из вырожденного электронного газа (т.е. фактически белые карлики), в то время как

новые объекты обладают гораздо более плотными ядрами из вырожденных нейтронов. Идея построить модели красных гигантов или сверхгигантов, заменив вырожденные электронные ядра компактными нейтронными ядрами, обсуждалась несколькими авторами, включая Ферми, Пачинского, Острайкера, Бисноватого-Когана, Сюняева и Торна. Ссылки можно найти в статье Торна и Житковой [46]. Полезные ссылки даны также Бисноватым-Коганом и Ламзином [47]. Торн и Житкова написали очень подробную статью [46], в которой построили первые модели этих объектов. Теория объектов Торна–Житковой изучалась также в работах [47–49].

К сожалению, аккуратное моделирование объектов Торна–Житковой чрезвычайно сложно. Главная проблема состоит в описании выделения, потери и переноса энергии в объекте — от центра до внешних слоёв нейтронного ядра — и в разрежённой конвективной оболочке. Наиболее сложная область находится вблизи дна конвективной оболочки (вблизи внешних слоёв "внутренней" нейтронной звезды). Этот слой является горячим, нейтринное излучение отводит много энергии, и конвекция крайне необычна. Небольшое усиление нейтринных потерь уменьшит поток тепла из нейтронной звезды к конвективной оболочке, ослабит конвекцию, и объект разрушится. Вариации теплопроводности и скоростей ядерных реакций в крайне необычных условиях в этих объектах тоже могут быть губительными. Надёжные наблюдательные свидетельства наличия таких объектов отсутствуют. Поэтому существование объектов Торна–Житковой до сих пор остаётся открытым вопросом.

## 8. Заключение

Мы описали зарождение теории нейтронных звёзд и вклад Ландау в эту теорию (см. также хронологию событий в приложении). Основной момент состоит в том, что в феврале 1931 г. в Цюрихе, за год до открытия нейтрона, Ландау написал замечательную статью [10]. В ней он рассчитал предельную массу белых карликов (независимо от Чандraseкара, но позднее него) и предсказал существование плотных звёзд, которые выглядят как одно гигантское атомное ядро (как мы и представляем нейтронные звёзды сегодня). Ландау также предположил, что в этих плотных звёздах нарушаются законы квантовой механики. Будем снисходительны к Ландау за это предположение — ему было всего 23 года! Ландау обсудил свою статью с Бором и Розенфельдом в период с 28 февраля по 19 марта 1931 г., но опубликовал её лишь в феврале 1932 г., как раз в то время, когда было объявлено об открытии нейтрона. Случайное совпадение дат открытия нейтрона и публикации статьи Ландау вызвало неразбериху в литературе с попытками утверждать, что Ландау предсказал нейтронные звёзды сразу после того, как узнал о существовании нейтрона. Этого, безусловно, не было.

На вопрос о том, предсказал ли Ландау нейтронные звёзды, нельзя ответить однозначно. С одной стороны, да, он предсказал их, но без нейтронов и нарушая квантовую механику. Возможно, точнее сказать, что Ландау каким-то сверхъестественным образом предугадал существование нейтронных звёзд. Тем не менее мы не настаиваем на этом, а предлагаем читателю решать самому. Последующее предсказание нейтронных звёзд

Бааде и Цвикки [30] было, безусловно, более реалистичным.

Кроме того, в 1937 г. Ландау сформулировал идею о звёздах с нейтронными ядрами, которые впоследствии были названы объектами Торна–Житковой. Эти объекты трудно рассчитать, и они не наблюдались.

После автомобильной аварии в 1962 г. Ландау был нездоров, испытывал непрерывные боли и не мог сосредоточиться на науке. Он умер 1 апреля 1968 г., когда широко обсуждалось открытие нейтронных звёзд как радиопульсаров. Статья об этом открытии была опубликована в *Nature* [1] 24 февраля 1968 г. Даже если Ландау и сообщили об открытии нейтронных звёзд, оно ему было определённо неинтересно и он не мог осознать важность своего вклада в физику компактных звёзд. Мы хотели напомнить читателю об этом вкладе и сформулировать его сущность.

Мы глубоко признательны Финну Асруду и Фелисиti Порс из Архива Нильса Бора в Копенгагене за розыск материалов, относящихся к этой истории. Кроме того, мы очень благодарны Геннадию Горелику и Алексею Кожевникову за полезные комментарии, а также Николя Шамелю, Юрию Николаевичу Гнедину и Петру Сергеевичу Штернину за помощь в розыске старых публикаций.

## 9. Приложение. Хронология

1. Февраль 1931 г., Цюрих. Ландау заканчивает статью [10], в которой он рассчитал максимальную массу белых карликов и предсказал существование плотных звёзд, выглядящих как гигантские атомные ядра.

2. 25 февраля – 19 марта 1931 г. Ландау в Копенгагене. Весьма вероятно, что Ландау обсуждал статью [10] с Бором и Розенфельдом в период с 28 февраля (когда в Копенгаген приехал Розенфельд) до 19 марта.

3. 7 января 1932 г. Ландау посыпает статью [10] в *Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion*.

4. Конец января 1932 г. Чедвик задумывает провести эксперимент, который привёл к открытию нейтрона.

5. 17 февраля 1932 г. Чедвик посыпает в *Nature* статью [22] об открытии нейтрона.

6. 24 февраля 1932 г. Чедвик пишет письмо Бору, информируя его об открытии нейтрона.

7. 27 февраля 1932 г. Статья Чедвика об открытии нейтрона [22] опубликована.

8. 29 февраля 1932 г. Статья Ландау [10] опубликована.

9. 15 – 16 декабря 1933 г., Стэнфорд. Бааде и Цвикки делают доклад на съезде Американского физического общества, предлагая концепцию нейтронных звёзд и их образования во вспышках сверхновых.

10. 15 января 1934 г. Тезисы доклада Бааде и Цвикки [30] опубликованы.

## Список литературы

1. Hewish A, Bell S J, Pilkington J D H, Scott P F, Collins R A *Nature* **217** 709 (1968)
2. Haensel P, Potekhin A Y, Yakovlev D G *Neutron Stars I: Equation of State and Structure* (New York: Springer, 2007)
3. Rosenfeld L, in *Astrophysics and Gravitation. Proc. 16th Solvay Conf. on Physics* (Brussels: Univ. Bruxelles, 1974) p. 174
4. Baym G, Pethick C *Annu. Rev. Nucl. Sci.* **25** 27 (1975)
5. Baym G, in *The Neutron and its Applications, 1982, Proc. Conf. to mark the 50th Anniversary of the Discovery of the Neutron, 13–17 September, 1982, Cambridge Univ., UK* (IOP Conf. Ser., No. 64, Ed. P Schofield) (Bristol: The Institute of Physics, 1982) p. 45
6. Shapiro S L, Teukolsky S A *Black Holes, White Dwarfs, and Neutron Stars: The Physics of Compact Objects* (New York: Wiley, 1983) [Шапиро С Л, Тью колски С А *Черные дыры, белые карлики и нейтронные звёзды* Т. 1, 2 (М: Мир, 1985)]
7. УФН **168** 701 (1998) [*Phys. Usp.* **41** 621 (1998)]
8. Бессараb M *Страницы жизни Ландау* (М.: Московский рабочий, 1971)
9. Pais A 1991 *Niels Bohr's Times. In Physics, Philosophy, and Polity* (Oxford: Clarendon Press, 1991)
10. Landau L D “On the theory of stars” *Phys. Z. Sowjetunion* **1** 285 (1932) [Пер. на русск. яз.: Ландау Л Д *Собрание трудов* Т. 1 (М.: Наука, 1969) с. 86]
11. Hufbauer K *Hist. Stud. Phys. Biol. Sci.* **37** 337 (2007)
12. Landau L D “On the theory of stars”, in *Collected Papers of L D Landau* (Ed. D ter Haar) (London: Pergamon, 1965) p. 60
13. Landau L D “On the theory of stars”, in *Neutron Stars, Black Holes, and Binary X-ray Sources* (Astrophys. Space Sci. Library, Vol. 48, Eds H Gursky, R Ruffini) (Dordrecht: D. Reidel Publ. Co., 1975) p. 271
14. Nauenberg M *J. History Astron.* **39** 297 (2008)
15. Shaviv G *The Life of Stars. The Controversial Inception and Emergence of the Theory of Stellar Structure* (Heidelberg: Springer, 2009)
16. Anderson W Z. *Phys.* **56** 851 (1929)
17. Stoner E C *Philos. Mag.* **9** 944 (1930)
18. Chandrasekhar S *Astrophys. J.* **74** 81 (1931)
19. Бронштейн М П, в сб. *Успехи астрономических наук* Т. 2 (М.: ОНТИ, 1933) с. 84
20. Landau L, Peierls R Z. *Phys.* **69** 56 (1931)
21. Rutherford E *Proc. R. Soc. London A* **97** 374 (1920)
22. Chadwick J *Nature* **129** 312 (1932)
23. Chadwick J, in *Proc. of X Intern. Congress on the History of Science* Vol. 1 (Paris: Hermann, 1962) p. 159
24. Curie I, Joliot F C. *R. Acad. Sci. Paris* **194** 273 (1932)
25. Chadwick J *Proc. R. Soc. London A* **136** 692 (1932)
26. Bothe W, Becker H Z. *Phys.* **66** 289 (1930)
27. Curie I C. *R. Acad. Sci. Paris* **193** 1412 (1931)
28. Webster H C *Proc. R. Soc. London A* **136** 428 (1932)
29. Iwanenko D *Nature* **129** 798 (1932)
30. Baade W, Zwicky F *Phys. Rev.* **45** 138 (1934)
31. Baade W, Zwicky F *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **20** 254 (1934)
32. Baade W, Zwicky F *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **20** 259 (1934)
33. Baade W, Zwicky F *Phys. Rev.* **46** 76 (1934)
34. Kirshner R P *Ann. New York Acad. Sci.* **302** 81 (1977)
35. Rosenfeld L, in *Niels Bohr and the Development of Physics* (Ed. W Pauli, Assist. L Rosenfeld, V Weisskopf) (New York: Pergamon Press, 1955) p. 70
36. Milne E A *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **92** 610 (1932)
37. Chandrasekhar S *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **95** 207 (1935)
38. Chandrasekhar S *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **95** 227 (1935)
39. Gamow G *Structure of Atomic Nuclei and Nuclear Transformations* (Oxford: Clarendon Press, 1937) Ch. XII
40. Hund F *Ergebn. Exakt. Naturwiss.* **15** 189 (1936)
41. Ландау Л Д *ДАН СССР* **17** 301 (1937)
42. Landau L *Nature* **141** 333 (1938)
43. Bohr N “Letter to L Landau on 6 December 1937”, in *Bohr Letter Collection*, Copenhagen
44. Фейнберг Е Л *Природа* (1) 65 (1998)
45. Bethe H A *Phys. Rev.* **55** 434 (1939)
46. Thorne K S, Zytkow A N *Astrophys. J.* **212** 832 (1977)
47. Бисноватый-Коган Г С, Ламзин С А *Астрон. журн.* **61** 323 (1984) [Bisnovaty-Kogan G S, Lamzin S A *Sov. Astron.* **28** 187 (1984)]

48. Eich C, Zimmermann M E, Thorne K S, Źytkow A N *Astrophys. J.* **346** 277 (1989)
49. Барков М В, Бисноватый-Коган Г А, Ламзин С А *Astron. журн.* **78** 269 (2001) [Barkov M V, Bisnovatyi-Kogan G S, Lamzin S A *Astron. Rep.* **45** 230 (2001)]

## L.D. Landau and the concept of neutron stars

### D.G. Yakovlev

*A.F. Ioffe Physical Technical Institute, Russian Academy of Sciences,  
ul. Politekhnicheskaya 26, 194021 St.-Petersburg, Russian Federation  
Tel. +7 (812) 292 71 80. Fax +7 (812) 247 10 17  
E-mail: yak.astro@mail.ioffe.ru, d.g.yak@yandex.ru*

### P. Haensel

*N. Copernicus Astronomical Center,  
Bartycka 18, 00-716 Warsaw, Poland*

### G. Baym

*Department of Physics, University of Illinois,  
1110 W. Green Street, Urbana, Illinois 61801, USA*

### C. Pethick

*Niels Bohr International Academy, Niels Bohr Institute, Blegdamsvej 17, DK-2100, Copenhagen, Denmark;  
NORDITA, Royal Institute of Technology and Stockholm University, Roslagstullsbacken 23, SE-10691 Stockholm, Sweden*

We review L. Landau's role in the history of neutron star physics in the 1930s. According to recollections of Rosenfeld (*Proc. 16th Solvay Conference on Physics*, 1974, p. 174), Landau improvised the concept of neutron stars in a discussion with Bohr and Rosenfeld just after the news of the discovery of the neutron reached Copenhagen in February 1932. We present arguments that the discussion must have taken place in March 1931, before the discovery of the neutron, and that they in fact discussed the paper written by Landau in Zurich in February 1931 but not published until February 1932 (*Phys. Z. Sowjetunion* **1** 285). In this paper Landau mentioned the possible existence of dense stars which look like one giant nucleus; this could be regarded as an early theoretical prediction or anticipation of neutron stars, however, prior to the discovery of the neutron. The coincidence of the dates of the neutron's discovery and the paper's publication has led to an erroneous association of Landau's paper with the discovery of the neutron. In passing, we outline the contribution of Landau to the theory of white dwarfs and to the hypothesis of stars with neutron cores.

PACS numbers: **01.65.+g, 26.60.-c, 97.60.Jd**

DOI: 10.3367/UFNr.0183.201303f.0307

Bibliography — 49 references

Received 1 October 2012

*Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **183** (3) 307–314 (2013)

*Physics – Uspekhi* **56** (3) (2013)